СТИВЕН
ХОКИНГ
ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ
ЛЕКЦИИ BBC
BBC

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

У вас в руках сборник рейтовских лекций Стивена Хокинга о черных дырах, прочитанных на BBC Radio 4. Трудно вообразить, кто мог бы рассказать об одних из самых загадочных космических объектов интереснее и проще, чем человек, сделавший космологию популярной наукой и отдавший многие годы изучению связанных с черными дырами эффектов. Те вопросы, которые остались без ответа, растолковал Дэвид Шукман, научный редактор BBC. Рейтовские лекции, или лекции имени лорда Джона Рейта, первого генерального директора BBC, просветителя и популяризатора, – цикл научно-популярных записей. С момента основания в 1948 году в студии выступили Бертран Рассел, Роберт Оппенгеймер, Джонатан Сакс и другие.

- Стивен Хокинг
  -
  - Предисловие
  - У черных дыр нет волос?
  - Черные дыры не так черны, как их малюют
  - Мягкие волосы черной дыры[21]
  -
- notes
  - 1
  - 2
  - 3
  - 4
  - 5
  - 6
  - 7
  - 8
  - 9
  - 10
  - 11
  - 12
  - 13
  - 14
  - 15
  - 16
  - 17
  - 18
  - 19
  - 20

- ○ 21
- ○ 22
- ○ 23
- ○ 24
- ○ 25
- ○ 26

Стивен Хокинг
Черные дыры. Лекции BBC

© Stephen Hawking, 2016.

The illustrations were produced by Cognitive (wearecognitive.com) for BBC Radio 4.

© ООО «Издательство АСТ», 2020 (оформление, перевод на русский язык)

The BBC logo is a trade mark of the British Broadcasting Corporation and is used under licence.

Предисловие
Дэвид Шукмен

В личности Стивена Хокинга многое восхищает и удивляет: и гений, запертый в ловушке больного тела, и улыбка, которая освещает лицо, ставшее почти неподвижным, и механический голос, который приглашает нас разделить радость познания, все также доступного его уму, не знающему границ и летящему через неизведанную Вселенную.

Несмотря на жизненные трудности этот замечательный человек смог выйти за привычные грани современной науки. Книга Стивена Хокинга «Краткая история времени» на сегодняшний день разошлась ошеломляющим тиражом в десять миллионов экземпляров. Тому, что ее автор стал настоящей мировой знаменитостью, есть множество подтверждений: это и эпизодические роли в популярных комедийных передачах, и приглашения в Белый дом, и хорошо принятый зрителями документальный фильм о его жизни. Стивен Хокинг стал самым знаменитым ученым в мире, ни больше и ни меньше.

В 60-е годы прошлого века врачи поставили ученому диагноз «боковой амиотрофический склероз» (заболевание двигательных нейронов; англ. *motor neurone disease, MND*) и отпустили ему всего два года жизни. И вот спустя пятьдесят лет Стивен Хокинг продолжает быть исследователем, писателем, путешественником и героем выпусков новостей. Его дочь Люси объясняет такую жажду жизни отца «чрезвычайным упрямством».

Хокинг пленяет воображение людей – то ли историей наполненной болью личной жизни, то ли способностью воодушевлять. Недавно он предупредил о том, что в последнее время человечество столкнулось с серией катастроф собственного производства – от глобального потепления до искусственно созданных вирусов. Опубликованная на сайте BBC статья на эту тему пользовалась большой популярностью в тот день.

Сколько трагической иронии в том, что такой общительный человек не может вступить в нормальный разговор. Чтобы взять интервью у Стивена Хокинга, вопросы нужно отправить заранее. Несколько лет назад его помощники предупредили меня, чтобы я не пытался завести непринужденной спонтанной беседы, потому что ответы даже на самые простые вопросы придется очень долго составлять. Но, волнуясь перед встречей с ним, я все же не удержался и выпалил: «Как вы поживаете?» И после виновато ждал ответа. У него все было хорошо.

В его кабинете в Кембридже доска исписана уравнениями. Сложнейшая математика – язык современной космологии. Уникальный вклад Стивена Хокинга в методологию научных исследований заключается в том, что он одновременно применяет подходы внешне очень разных разделов науки. Так, он изучает глобальное пространство-время с помощью научных приемов, разработанных для исследования мельчайших частиц внутри атомов.

Коллеги Стивена Хокинга по работе в таких нечеловечески сложных областях могут опасаться, что их труды навсегда останутся непонятными для широкой общественности. Но конек Хокинга именно в умении делать сверхсложное доступным для огромной аудитории. В 2016 году в рамках радиолектория BBC имени Джона Рейта (*BBC Reith Lectures*) в двух пятнадцатиминутных выступлениях Стивен Хокинг смог просуммировать результаты своих исследований внутреннего устройства черных дыр, которым посвятил всю жизнь. В ключевых местах выступления Стивена Хокинга я добавил примечания – в помощь любознательным, но пришедшим в недоумение читателям и тем, кто в восторге от такой идеи, но терзается сомнениями в своей подкованности.

У черных дыр нет волос? Радиотрансляция 26 января 2016 года

Говорят, что иногда факты оказываются более удивительными, чем вымысел – и это как нельзя более справедливо в отношении черных дыр. Имеющие твердое научное

обоснование, черные дыры «страннее» всего, что когда-либо выдумывали писатели-фантасты. Научное сообщество долго силилось примириться с идеей о том, что массивные звезды могут коллапсировать – сжиматься – сами по себе, под действием собственной силы тяжести, и о том, как такие объекты могли бы эволюционировать, если были бы предоставлены сами себе. Альберт Эйнштейн в 1939 году даже написал статью, в которой утверждал, что звезды не могут коллапсировать под действием гравитационных сил, потому что вещество не может быть сжато сильнее определенного предела. Многие современники Эйнштейна доверяли его интуиции и вполне разделяли его мнение, а главным оппонентом был американский ученый Джон Уилер, во многих отношениях один из главных персонажей в истории черных дыр. В работах 1950–1960-х годов Уилер подчеркивал, что многие звезды на финальной стадии эволюции могут коллапсировать, и указывал на возникающие в связи с этим проблемы для теоретической физики. Ученый предвидел и многие свойства объектов – черных дыр, – в которые превращаются коллапсирующие звезды.

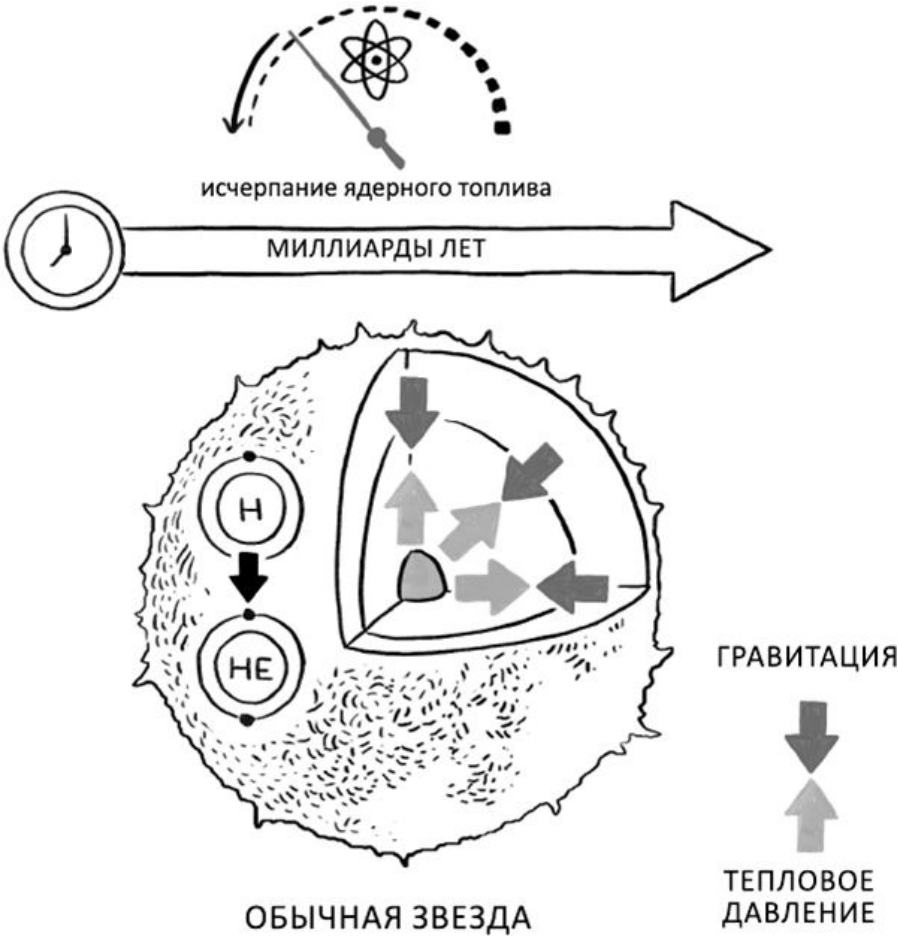
> *Д. Ш.: Словосочетание «черная дыра», как кажется, вполне доступно для понимания, однако трудно вообразить такой объект в космическом пространстве. Мне представляется что-то вроде гигантской вращающейся воронки, по которой вещество спускается по спирали вниз, к центру. Стоит какому-либо объекту оказаться на краю этой воронки, называемом «горизонтом событий», – и пути назад не будет. Обладая невероятно мощной гравитацией, черные дыры всасывают даже свет, и поэтому фактически такие объекты невидимы для наблюдателя. Ученые узнают об их существовании по разорванным в клочья звездам, имевшим неосторожность оказаться слишком близко, а еще по «дрожи пространства». Последнее происходит, например, в результате слияния двух черных дыр, при котором рождаются гравитационные волны. Одно такое событие, произошедшее более миллиарда лет назад, было недавно зарегистрировано учеными, что явилось значительным научным достижением.*

На протяжении многих миллиардов лет своего существования обычная звезда поддерживает равновесие гравитационных сил и теплового давления, вызванного ядерными процессами преобразования водорода в гелий.

Д. Ш.: НАСА описывает звезды как эдакие скороварки: взрывная мощность ядерного синтеза внутри звезд создает внешнее давление, которое препятствует силам гравитационного сжатия.

Наступает момент, когда звезда исчерпывает свое ядерное топливо. И тогда она начинает сжиматься. В некоторых случаях звезда достигает состояния равновесия, превращаясь в белого карлика. Однако, как в 1930 году вычислил Субраманьян Чандрасекар, максимально возможная масса такого объекта не должна превышать 1,4 солнечной массы. К такому же выводу пришел и советский физик Лев Ландау, проведя расчет для звезды, целиком состоящей из нейтронов.

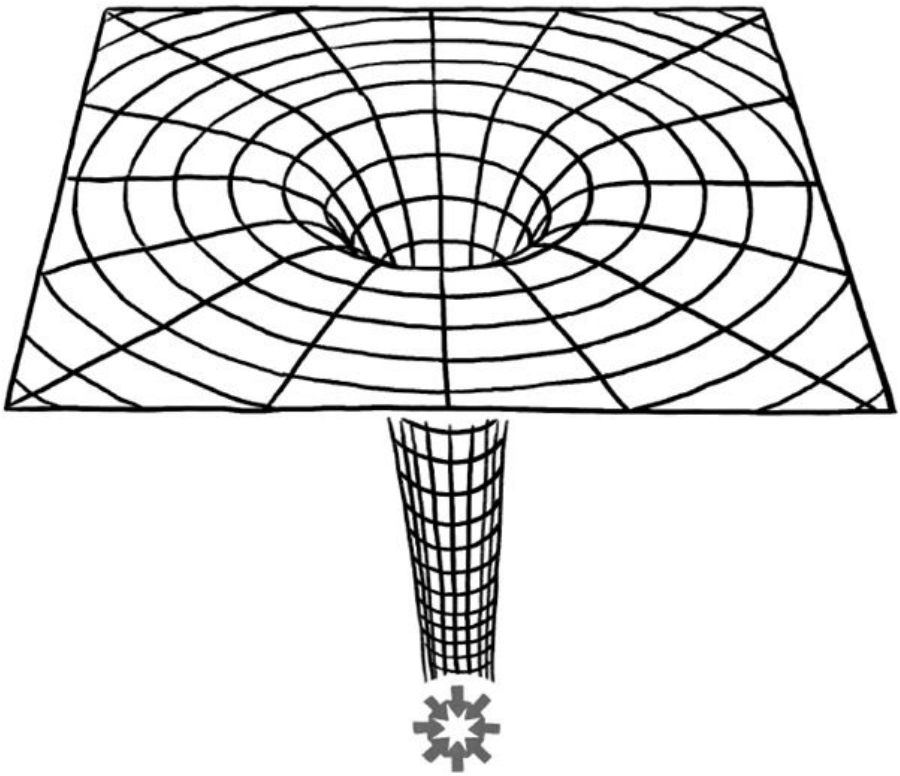
Д. Ш.: Белые карлики и нейтронные звезды когда-то тоже были солнцами, но с тех пор сожгли все топливо. Исчерпались раздувающие их силы, и больше ничего не могло остановить их гравитационное сжатие. Так они стали одними из самых плотных объектов во Вселенной. Однако по сравнению с другими звездами их размеры невелики. Это означает, что их гравитационное поле не настолько сильно, чтобы заставить их полностью коллапсировать. Самое интересное – для Стивена Хокинга и других исследователей – это то, что случается с самыми большими звездами, когда их жизненный путь близится к завершению.



Что же произойдет при полном исчерпании ядерного топлива с огромным количеством звезд, масса которых больше массы белого карлика или нейтронной звезды? Этой проблемой занимался Роберт Оппенгеймер, имя которого связано с созданием атомной бомбы. В нескольких статьях, написанных в 1939 году совместно с Джорджем Волковым и Хартлэндом Снайдером, он показал, что существование такой звезды не может поддерживаться ее собственным внутренним давлением. Если взять простую задачу, рассматривающую сжатие однородного сферического тела, исключив из расчета давление, то получится, что такое тело сожмется в точку с бесконечной плотностью. Такая точка называется сингулярностью.

Д. Ш.: Сингулярность – это то, что получится в конечном итоге, если гигантская звезда сожмется в невообразимо малый объект. Именно сингулярность оказалось ключевой темой научных исследований Стивена

Хокинга. Это понятие относится не только к финальной стадии эволюции массивной звезды, но и к куда более фундаментальной идее о начальной точке зарождения всей Вселенной. Мировую известность Хокингу принесли математические работы о сингулярностях.



Все наши теории о пространстве основаны на предположении, что пространство-время гладкое и почти плоское и что оно «ломается» только внутри сингулярности, где кривизна пространства-времени становится бесконечной. В действительности сингулярность обозначает конец самого времени – факт, который Эйнштейн считал совершенно неприемлемым.

Д. Ш.: Согласно общей теории относительности Эйнштейна все тела вблизи себя искажают пространство-время. Наглядную иллюстрацию сил гравитационного притяжения представляет тяжелый шар для игры в боулинг, лежащий на батуте: поверхность прогибается, вынуждая расположенные рядом с шаром небольшие предметы соскальзывать в углубление вокруг него. Если масса шара очень велика, то предметы

опускаются глубже и глубже, в некотором пределе падая в бесконечно глубокий колодец, в котором перестают действовать обычные законы пространства-времени.

Началась Вторая мировая война. Большинство ученых, включая Роберта Оппенгеймера, переключили внимание на разработки в области ядерной физики, и задачка о гравитационном коллапсе была заброшена. Интерес к этой теме вернулся с открытием далеких космических объектов – квазаров.

Д. Ш.: Квазары – ярчайшие объекты во Вселенной и, возможно, самые далекие из всех обнаруженных космических объектов. Их название происходит от словосочетания «квазизвездные радиоисточники» (англ. QUASi stellAR radio sourse*); они представляют собой вещество, закручивающееся вокруг черной дыры*[1].

Первый квазар, названный 3C273[2], был обнаружен в 1963 году[3]. Вскоре были обнаружены многие другие квазары. Несмотря на удаленность от нас, это очень яркие объекты. Ядерные процессы не могут полностью объяснить количества выбрасываемой ими энергии, потому что только небольшая часть их массы покоя преобразуется в чистую энергию. Единственная альтернатива – гравитационная энергия, выделяющаяся при гравитационном коллапсе. Таким образом, снова возродился интерес к проблеме гравитационного коллапса звезд.

Уже было ясно, что однородная звезда правильной сферической формы должна сжиматься в точку, обладающую бесконечной плотностью, то есть в сингулярность. Уравнения Эйнштейна не применимы к сингулярности. Это означает, что невозможно предсказать, что произойдет в такой точке в следующий момент. Последнее в свою очередь подразумевает, что всякий раз, когда звезда коллапсирует, может случиться что-нибудь странное. На нас никак не повлияла бы невозможность сделать прогноз, если бы сингулярность была «голой», то есть была бы доступна нашим наблюдениям.

Д. Ш.: Существование «голой» сингулярности – это теоретический сценарий коллапса звезды, при котором вокруг нее не образуется горизонт событий и, следовательно, сингулярность можно наблюдать.

В 1967 году Джон Уилер ввел в научный обиход термин «черная дыра», и он заменил более раннее название «замороженная звезда». Так ученый хотел подчеркнуть тот факт,

что остатки сжавшейся звезды представляют интерес сами по себе, вне зависимости от того, как они образовались. Новый термин быстро прижился. Он намекал на нечто темное, загадочное… Не обошлось без курьезов. Но французы – и это так похоже на них – посчитали новое именование немного рискованным. Словосочетание *trou noir* они назвали непристойным и долгое время не принимали его. Однако протестовать было так же нелепо, как против прижившегося *le weekend* и других помесей французского и английского. В конце концов оставили все как есть – кто может сопротивляться такой научной знаменитости?

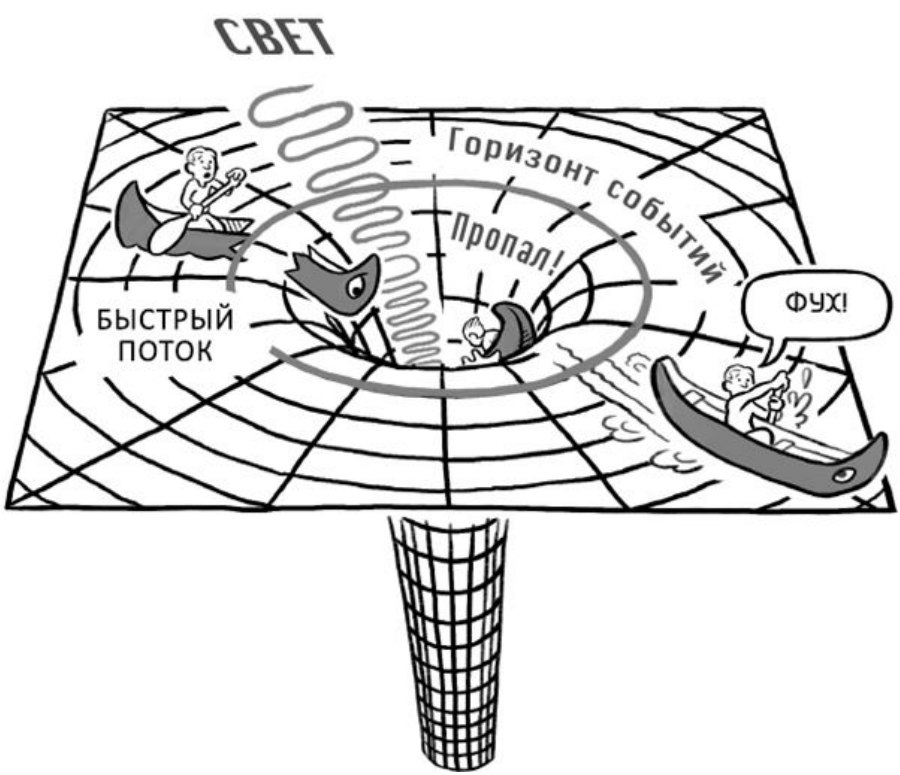
Находясь снаружи, вы не сможете сказать, что находится внутри черной дыры. Вы можете забросить туда телевизор, кольцо с бриллиантами или даже своих злейших врагов – черная дыра будет «помнить» только о своей общей массе, угловой скорости вращения, электрическом заряде и больше ни о чем. Джон Уилер известен еще и тем, что дал афористичное описание этому свойству черных дыр: «У черной дыры нет волос». Что лишний раз подтвердило нехорошие подозрения французов.

У черной дыры есть граница, называемая горизонтом событий. Это сфера, на которой гравитационные силы настолько сильны, что притягивают даже свет и не дают ему уйти.

Поскольку ничто не может двигаться быстрее света, черная дыра тем более затянет его в свои недра. Падение сквозь горизонт событий сравнимо с путешествием по Ниагарскому водопаду в каноэ. Если вы плывете выше водопада, то еще есть возможность спастись, если грести достаточно быстро. Однако как только вы пересечете критическую линию у основания водопада – вы пропали. Пути назад нет. Чем ближе к водопаду, тем стремительнее течение. Это означает, что нос каноэ будет тянуть сильнее, чем корму. Каноэ может попросту разорвать пополам. То же самое происходит и в черной дыре. Если вы приближаетесь к ней ногами вперед, то приливные силы будут сильнее тянуть за ноги, чем за голову – ведь ноги ближе к черной дыре. В результате вы будете растянуты в длину и сдавлены с боков. Если масса черной дыры в несколько раз превышает солнечную, то вы превратитесь в спагетти еще до того, как достигнете горизонта. Однако если вы соберетесь упасть в куда более массивную черную дыру с массой в несколько миллионов солнечных, то вы без труда достигнете горизонта. Одним словом, если хотите разузнать, что находится внутри черной дыры, убедитесь, что ваш выбор пал на достаточно большой экземпляр. Кстати, в центре нашей Галактики (которая называется Млечный Путь) есть прекрасная черная дыра с массой около четырех миллионов масс Солнца.

> *Д. Ш.: Ученые считают, что гигантские черные дыры есть в центрах очень многих галактик. Это замечательная мысль, тем более что недавно это было подтверждено наблюдениями.*

Пересекая горизонт событий огромной черной дыры, вы не заметите ничего особенного, а некто наблюдающий за вами издалека никогда не заметит, что вы пересекли горизонт событий. Наоборот, ему будет казаться, что ваше движение замедлилось и что вы парите в непосредственной близости от горизонта событий. Ваш образ будет становиться все туманнее и туманнее, все краснее и краснее, пока вы и вовсе не исчезнете из виду. Для мира за пределами черной дыры вы будете потеряны навсегда.



Д. Ш.: Поскольку даже свет не может вырваться из черной дыры, то нет никакого способа передать наружу какие-либо свидетельства вашего погружения в нее. В безвоздушном космическом пространстве никто не услышит ваших криков, а в черной дыре никто не заметит, как вы исчезнете.

Мы сильно продвинулись в понимании этого загадочного феномена с тех пор, как были опубликованы новые математические соображения – в 1970 году. Дело в том, что площадь горизонта событий[4] характеризуется тем, что может только увеличиваться, когда вещество или излучение падают в черную дыру. Это свойство предполагает, что можно провести аналогию между понятием площади горизонта черной дыры и классической физикой, в частности, понятием энтропии в термодинамике. Энтропия некоторой системы – это мера хаотичности в ней или, что то же самое, мера неопределенности ее состояния. Знаменитое второе начало термодинамики гласит, что энтропия системы всегда возрастает со временем. И математическая модель, предложенная в 1970 году, положила начало исследованиям этой важнейшей связи.

Д. Ш. Энтропия определяет тенденцию упорядоченной системы становиться со временем все более неупорядоченной, неорганизованной. К примеру, стена из аккуратно пригнанных друг к другу кирпичей – это система с низкой энтропией. Со временем стена ветшает, рассыпается и превращается в неприглядную кучу мусора, то есть приходит в состояние с высокой энтропией. Этот процесс описывается вторым началом термодинамики.

Несмотря на то, что связь между энтропией и площадью горизонта событий черной дыры стала очевидной, ученым не было ясно, как именно площадь может быть определена через энтропию черной дыры. Что вообще значит словосочетание «энтропия черной дыры»? Важное предположение сделал в 1972 году Яаков Бекенштейн, аспирант Принстонского университета; позднее он стал сотрудником Еврейского университета в Иерусалиме. Идея заключается в следующем. В результате гравитационного коллапса формируется черная дыра, и она быстро переходит в некоторое стационарное состояние, которое определяется только тремя параметрами: массой, угловой скоростью вращения и электрическим зарядом. Помимо этих трех характеристик черная дыра не хранит больше ничего от того объекта, который коллапсировал.

Эта теорема имеет отношение к проблеме сохранения информации (применительно к космологии), а именно несет идею о том, что каждая частица и каждое взаимодействие во Вселенной содержит ответ на закрытый вопрос, то есть такой,

который подразумевает реакцию «да» или «нет».

> *Д. Ш.: Под информацией в этом контексте понимаются абсолютно все характеристики любой частицы и любой силы, ассоциированных с данным объектом или системой. Чем больше неупорядоченность системы, то есть чем выше ее энтропия, тем больше информации требуется для ее полного описания. По словам британского физика-теоретика Джима Аль-Халили, хорошо перетасованная колода карт обладает высокой энтропией и ее описание требует большего числа параметров, или информации, чем описание неперетасованной колоды*[5].

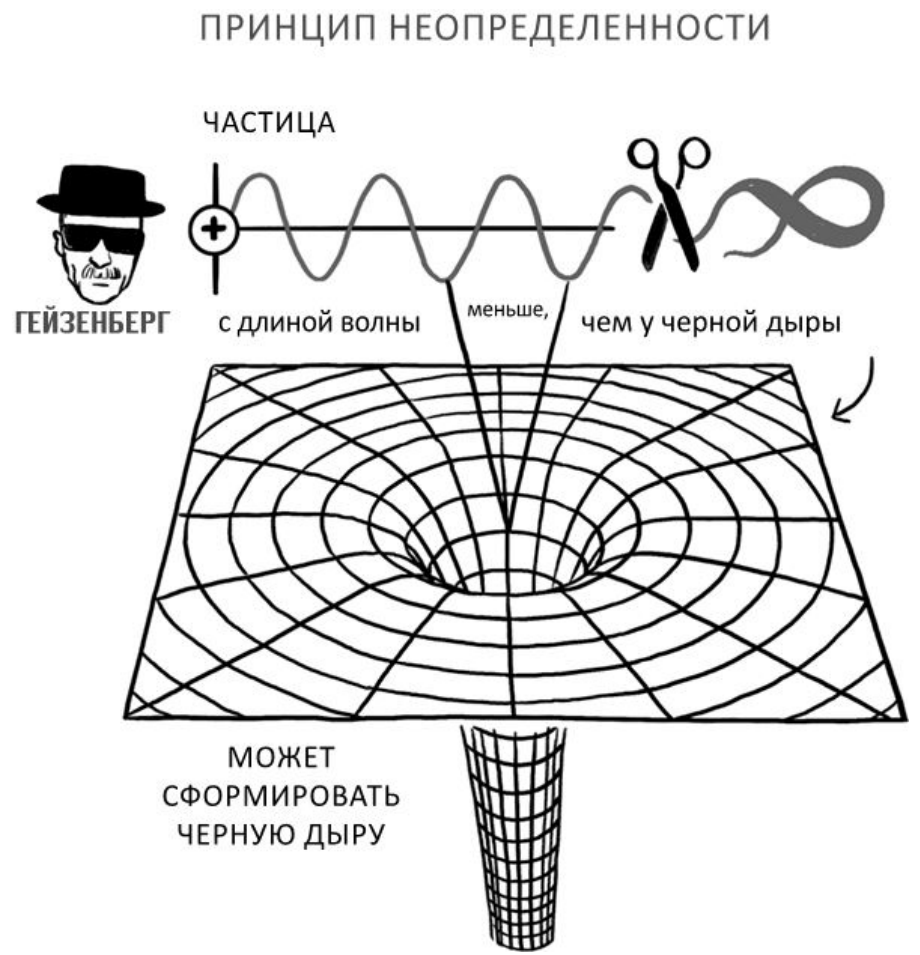
Теорема Бекенштейна означает, что в результате гравитационного коллапса теряется большое количество информации. Например, финальное состояние коллапсирующего объекта – черная дыра – не зависит от того, из чего первоначально состоял этот объект, из вещества или антивещества, или какой он был формы – сферической или совершенно неправильной. Другими словами, черная дыра с конкретными массой, угловой скоростью и электрическим зарядом могла образоваться в результате коллапса любого сгустка вещества из очень длинного ряда, в том числе из звезды любого типа. Действительно, если принять во внимание квантовые эффекты, то количество потенциально возможных начальных конфигураций окажется бесконечным, потому что черная дыра может образоваться при сжатии облака неограниченно большого числа частиц, обладающих бесконечно малыми массами. Но может ли число возможных конфигураций и в самом деле оказаться бесконечным? Для ответа на этот вопрос нужно подробнее рассказать о квантовых эффектах.

Согласно принципу неопределенности в квантовой механике только частицы, длина волны которых уступает длине волны самой черной дыры, могут сформировать черную дыру. Это означает, что диапазон возможных волн ограничен: он не может быть бесконечным.

> *Д. Ш.: Принцип неопределенности, введенный знаменитым немецким физиком Вернером Гейзенбергом в 20-х годах прошлого века, постулирует, что невозможно локализовать частицы или предсказать их точное положение. Таким образом, на так называемых квантовых масштабах длин в природе существует неопределенность, которая не соответствует*

упорядоченной Вселенной Исаака Ньютона.

Таким образом, число конфигураций, которые могли бы сформировать черную дыру с конкретными параметрами массы, вращения и электрического заряда, хотя и велико, но конечно. Яаков Бекенштейн предположил, что из этого конечного числа и можно определить энтропию черной дыры. Это мера количества информации, которая будет утеряна безвозвратно во время коллапса и формирования черной дыры.



Существенный недостаток рассуждений Бекенштейна заключается в том, что если черная дыра обладает конечной энтропией, величина которой пропорциональна площади горизонта событий черной дыры, она также должна обладать и какой-то конечной температурой, которая в свою очередь должна быть пропорциональна поверхностной гравитации черной дыры. Все вышесказанное означает, что черная дыра может находиться в

состоянии равновесия по отношению к тепловому излучению при какой-то отличной от нуля температуре. Однако согласно представлениям классической, неквантовой физики, такое равновесие невозможно, потому что черная дыра должна поглощать любое тепловое излучение, которое в нее попадает, и ничего не может излучать в ответ. Черная дыра не может излучать тепло.

> *Д. Ш.: Если информация теряется, что, по всей видимости, и происходит в черной дыре, должен иметь место выброс энергии, что противоречит тому постулату, что из черной дыры ничего не может выйти наружу.*

Налицо парадокс. К нему я вернусь в моей следующей лекции, в которой расскажу о том, как черные дыры пошли в наступление на основополагающий принцип предсказуемости Вселенной и достоверности свершившегося, и о том, что может случиться, если вас затянет в такую дыру.

> *Д. Ш.: Итак, вместе со Стивеном Хокингом мы совершили научное путешествие, которое началось с утверждения Эйнштейна о невозможности коллапса звезд. Мы были свидетелями того, как ученые смирились с существованием черных дыр, и теперь движемся к спору о том, как причуды сингулярностей существуют и функционируют.*

Черные дыры не так черны, как их малюют
Радиотрансляция 2 февраля 2016 года

В первой лекции я остановился на самом интересном: на парадоксе о природе черных дыр, невероятно плотных объектов, порожденных коллапсом звезд. Согласно одной из теорий, черные дыры с одинаковыми параметрами могут сформироваться из бесконечного разнообразия звезд. Другая теория говорит о том, что число возможных типов исходных объектов должно быть конечно. В этом заключается проблема информации, а именно: каждая частица и каждая сила во Вселенной в самой основе своей содержит ответ на закрытый вопрос – «да» или «нет».

Поскольку, как выразился физик-теоретик Джон Уилер, «у черной дыры нет волос», находясь снаружи черной дыры, невозможно сказать, что находится у нее внутри. Наблюдателю известно только три параметра черной дыры: ее масса, угловая

скорость вращения и величина электрического заряда. Это означает, что черная дыра содержит огромное количество информации, которая скрыта от внешнего мира. Если количество информации, спрятанное внутри черной дыры, зависит от размера черной дыры, то, исходя из общих физических принципов, можно ожидать, что черная дыра обладает температурой и, следовательно, должна светиться как раскаленный металл. Но это невозможно, потому что, как всем известно, ничто не может покинуть пределы черной дыры, в том числе и тепловое излучение. По крайней мере, так считалось.

Этот парадокс просуществовал до начала 1974 года, когда я исследовал поведение вещества вблизи черной дыры в свете законов квантовой механики[6].

> *Д. Ш.: Квантовая механика – наука о физических явлениях на микромасштабах [7]; она призвана объяснить поведение мельчайших частиц. Законы квантовой механики отличаются от законов, регулирующих поведение больших объектов, таких как планеты, то есть законов, впервые сформулированных Исааком Ньютоном. Использование этой «науки о малом» в изучении очень большого – основа оригинального подхода Стивена Хокинга.*

К моему огромному изумлению, я обнаружил, что черная дыра, похоже, испускает частицы с постоянной интенсивностью. Соглашаясь с тогдашним общепринятым мнением, я принял постулат о том, что черная дыра ничего не излучает. И поэтому пришлось приложить немало усилий в попытке избавиться от полученного мной досадного эффекта. Однако чем больше я работал над этим, тем более серьезные доводы получал в его защиту. В конце концов мне все же пришлось его принять. Окончательно я убедился в том, что это действительный физический процесс, когда математические расчеты показали: длины волн исходящих частиц в точности соответствовали тепловому излучению[8]. Согласно моим расчетам, черная дыра рождает и испускает частицы и излучение так же, как если бы она была обычным нагретым телом с температурой, пропорциональной ее поверхностной гравитации и обратно пропорциональной ее массе.

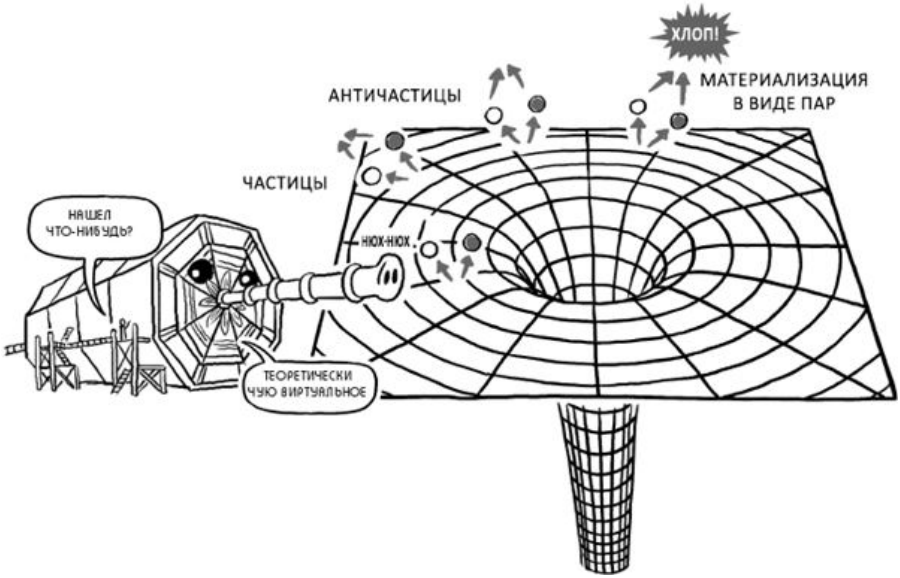
> *Д. Ш.: Это были первые расчеты, показавшие, что черная дыра – это не улица с односторонним движением, заканчивающаяся тупиком. Неудивительно, что найденное излучение получило имя автора и сегодня носит название*

«излучение Хокинга», или «испарение Хокинга».

С того времени правильность математических вычислений, доказавших тот факт, что черные дыры испускают тепловое излучение, подтвердили многие ученые, которые использовали разные подходы и методы. И вот один из способов понять, что собой представляет такое излучение. Согласно законам квантовой механики все пространство заполнено виртуальными парами частиц и античастиц, которые постоянно материализуются из вакуума, а затем тут же исчезают, аннигилируют друг с другом.

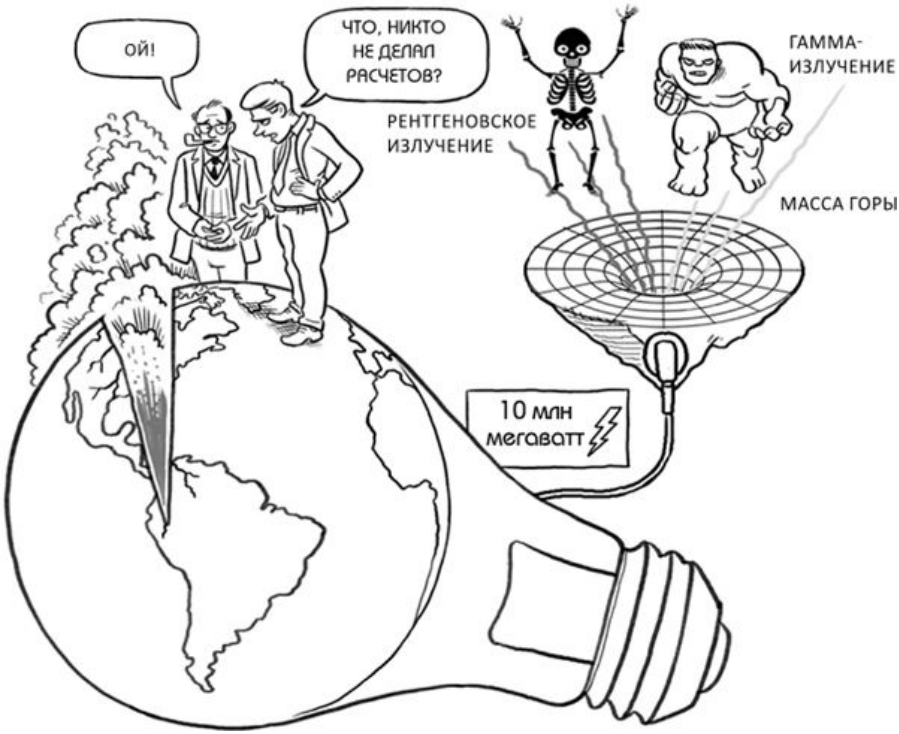
> *Д. Ш.: Эта концепция опирается на представление о том, что вакуум никогда не бывает абсолютно пустым. Согласно квантово-механическому принципу неопределенности всегда есть вероятность того, что частицы существуют, но недолго*[9]*. Таким образом, пары частиц с противоположными характеристиками будут постоянно появляться и исчезать.*

Эти частицы называются виртуальными, потому что в отличие от реальных частиц их нельзя регистрировать непосредственно с помощью детектора частиц. Однако косвенные следствия их присутствия могут быть измерены. Существование этих частиц подтверждается небольшим сдвигом, называемым лэмбовским сдвигом, который они производят для одного уровня энергетического спектра возбужденных атомов водорода[10]. В присутствии черной дыры одна виртуальная частица пары может влететь под горизонт, пропав навсегда, а вторая частица этой пары останется без партнера, необходимого для взаимной аннигиляции. Оставшаяся частица (или античастица) может и сама упасть в черную дыру вслед за своим партнером, но она может и уйти от черной дыры на бесконечность и тогда будет выглядеть как излучение черной дыры[11].



Д. Ш.: Ключевым моментом в таком процессе является то, что рождение и исчезновение виртуальных частиц, как правило, проходит незамеченным. Однако если это происходит непосредственно на краю черной дыры, то одна частица пары может оказаться втянутой в черную дыру, а другая – нет. И убегающая частица будет выглядеть в точности так, как если бы черная дыра «выплюнула» ее.

Черная дыра с массой, равной массе Солнца, будет излучать указанным способом частицы чрезвычайно медленно – настолько медленно, что этот процесс невозможно обнаружить. Однако могут существовать черные дыры и гораздо меньших масс, например, с гору[12]. Черная дыра размером с гору будет испускать рентгеновское и гамма-излучение, излучаемая энергия в секунду, или мощность, должна составить около 10 млн мегаватт. Такого количества энергии достаточно для снабжения электричеством всего мира. Однако использовать черную мини-дыру очень непросто. Дело в том, что ее нельзя поместить внутрь электростанции, потому что она тут же провалиться сквозь Землю и окажется в ее центре. Если бы мы действительно раздобыли такую черную дыру, то единственный способ ее удержать – поместить на земной орбите.

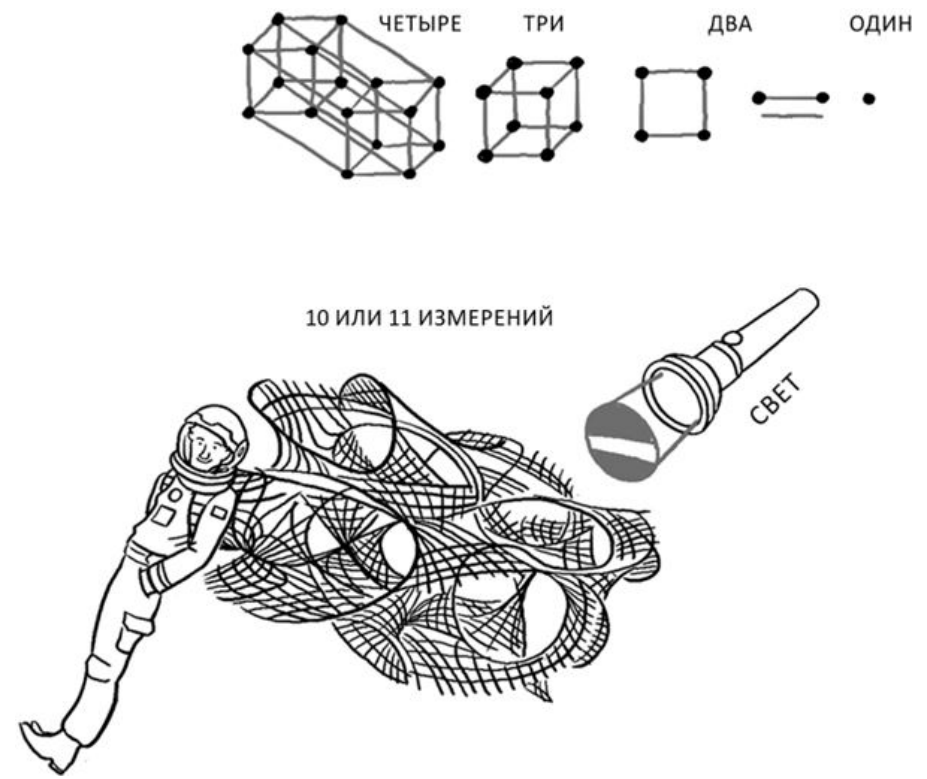


Ученые искали черные мини-дыры таких масс, но пока ничего не нашли. И очень жаль! Потому что если бы они отыскались, я получил бы Нобелевскую премию. Есть, правда, другая возможность заполучить черные мини-дыры – создать их самостоятельно в многомерном пространстве-времени.

> *Д. Ш.: Словосочетание «многомерное пространство-время» обозначает то, что выходит за пределы трех пространственных измерений, всем нам хорошо знакомых из повседневной жизни, в сочетании с четвертым – временем. Эта идея возникла как частная задача при попытках объяснить, почему гравитационные силы настолько слабее всех других сил в природе, например электромагнитных. Быть может, гравитация так слаба в нашем мире на малых масштабах, потому что вынуждена одновременно «работать» и в параллельных измерениях.*

Согласно некоторым теориям Вселенная, в которой мы живем, – это всего лишь четырехмерная поверхность в 10– или 11-мерном пространстве-времени. Фильм «Интерстеллар»[13] дает некоторое представление о том, на что это могло бы быть похоже. Дополнительные измерения мы, конечно, не видим. Дело в том,

что свет может распространяться только в четырехмерном пространстве-времени, он не может проникнуть в другие измерения. А вот гравитация вездесуща, и ее действие в дополнительных измерениях может оказаться гораздо сильнее, чем в нашем мире. Именно поэтому небольшая черная дыра смогла бы сформироваться в дополнительных измерениях. Возможно, этот процесс даже можно наблюдать при помощи БАК, Большого адронного коллайдера, в ЦЕРНе в Швейцарии. Этот ускоритель состоит из кругового тоннеля длиной 27 километров. Два пучка заряженных частиц двигаются по этому тоннелю в противоположных направлениях и сталкиваются. В результате некоторых столкновений могут родиться черные микродыры. Об их появлении на свет будут свидетельствовать излучаемые ими частицы определенного вида. Так что Нобелевская премия мне, быть может, еще и достанется!



Д. Ш.: Нобелевская премия по физике присуждается, когда теория «проверена временем». На практике это означает наличие веских доказательств. Например, Питер Хиггс был одним из ученых, которые еще в 1960-х годах предполагали существование частицы, благодаря которой другие частицы приобретают массу. Почти пятьдесят

лет спустя два независимых детектора на БАК зарегистрировали признаки объекта, ставшего известным как бозон Хиггса. Это был триумф науки и технологии, гениальной теории и ее неопровержимого доказательства. В итоге Питер Хиггс и бельгийский ученый Франсуа Энглерт были удостоены высшей научной награды. Что же касается излучения Хокинга, то пока никаких доказательств этого эффекта не обнаружено. Некоторые ученые предполагают, что зафиксировать его слишком сложно. Но это все еще может случиться, потому что с каждым годом наши знания о черных дырах умножаются.

Частицы, улетая от черной дыры, уменьшают ее массу, в результате чего черная дыра сокращается в размерах[14]. С уменьшением размера черная дыра излучает все интенсивнее. В конце концов она теряет всю свою массу и попросту исчезает. Возникает вопрос: что же тогда происходит со всеми частицами и незадачливыми космонавтами, когда-то давно попавшими в черную дыру? Они же не могут возникнуть снова, когда черная дыра исчезнет. Получается, что информация о том, что упало в черную дыру, пропала. Если не считать общей массы, скорости вращения и электрического заряда. Потеря информации приводит к серьезной проблеме, которая затрагивает самую суть нашего понимания науки[15].

Более двух веков ученые верили в научный детерминизм, согласно которому эволюция Вселенной подчиняется законам физики. Этот принцип сформулировал Пьер-Симон Лаплас. Он писал, что если нам известно положение Вселенной в какой-то момент времени, то законы физики определят ее положение в любой момент в будущем или прошлом. Наполеон как-то спросил Лапласа, как концепция Бога вписывается в такую полностью детерминированную картину мира. «Сир, – отвечал Лаплас, – я не нуждаюсь в этой гипотезе»[16]. Я не думаю, что Лаплас отрицал существование Бога – он говорил только о его невмешательстве в законы физики. Таковой должна быть позиция любого ученого. Научный закон не является подлинно научным, если опирается только на решение какого-либо сверхъестественного существа о том, выполняться этому закону или нет.

В концепции детерминизма Лапласа для предсказания будущего поведения некоторой системы необходимо знать точные положения и скорости всех частиц этой системы в некоторый момент времени. Но ведь есть принцип неопределенности Гейзенберга, который был сформулирован им в 1923 году и лег в основу квантовой механики[17].

Он постулирует, что чем более точно вы определяете положения частиц, тем менее точно вы можете определить их скорости, и наоборот. Другими словами, невозможно точно знать и положения, и скорости частиц. Как же тогда точно предсказать будущее поведение системы? Ответ такой: хотя и нельзя предсказать отдельно положения и скорости, но можно прогнозировать то, что называется «квантовым состоянием». Квантовое состояние – это нечто такое, из чего могут быть выведены и положения, и скорости, но только с некоторой точностью. Мы по-прежнему считаем, что Вселенная должна быть детерминированной – в том смысле, что если мы знаем квантовое состояние Вселенной в некоторый момент времени, то с помощью законов физики мы можем предсказать квантовое состоянии Вселенной в любой другой момент времени.

Д. Ш.: Начав с объяснений того, что происходит вблизи горизонта событий черной дыры, мы углубились в исследование некоторых важных философских вопросов в науке – перешли от точного, как часы, мира Ньютона к законам Лапласа, а потом к неопределенности Гейзенберга – и к тем аспектам, где его принцип перестает быть бесспорным ввиду загадочных свойств черных дыр. По сути, если согласно общей теории относительности Эйнштейна попадающая в черную дыру информация уничтожается, в квантовой теории информация не может быть уничтожена.

Если информация навсегда исчезает в черной дыре, мы не сможем предсказать будущее, потому что черная дыра может излучать любой набор частиц. Она может в принципе излучать работающие телевизоры или полное собрание сочинений Шекспира в кожаном переплете, хотя вероятность таких «экзотических излучений» будет ничтожно мала. На первый взгляд может показаться, что невозможность предсказать, что именно выйдет из черной дыры, не слишком-то важна. Рядом с нами ведь нет черных дыр. Но это дело принципа.

Если детерминизм, то есть предсказуемость Вселенной, нарушается при наличии черных дыр, то он может нарушиться и в другом контексте. Что еще хуже, если детерминизм в принципе может нарушаться, мы не можем быть уверенными не только в предсказании будущего, но и в знании прошлого. Учебники истории, наши воспоминания – все может оказаться иллюзией. Прошлое – это то, что рассказывает нам о том, кто мы есть. Не зная этого, мы теряем самих себя.

И поэтому чрезвычайно важно понять, действительно ли в черных дырах информация исчезает навсегда или гипотетически она может быть восстановлена. Многие ученые придерживались того мнения, что информация не теряется, но никто не предложил механизма, который помог бы ее сохранить17. Я думаю, что нашел ответ. Он имеет отношение к идее Ричарда Фейнмана, согласно которой вместо одной истории есть множество возможных историй, и все они разновероятны[18]. При таком подходе существуют два вида истории: в одной есть черная дыра, в которую могут падать частицы, а в другой ничего такого нет.

Вообще говоря, с точки зрения внешнего наблюдателя нельзя быть уверенным наверняка, существует черная дыра или нет. Так что всегда есть шанс, что черной дыры нет [19]. Такой возможности достаточно для сохранения информации, однако информация возвращается в виде, сложном для восприятия. Это как сжечь энциклопедию: в буквальном смысле информация не теряется, если сохранить весь дым и пепел, но такую книгу очень и очень трудно читать… Кип Торн и я поспорили с другими физиком, Джоном Прескиллом, что информация теряется в черных дырах. Но я обнаружил, что информация может быть сохранена, и проиграл. Тогда я подарил Джону Прескиллу энциклопедию. Быть может, нужно было вручить ему ее пепел.

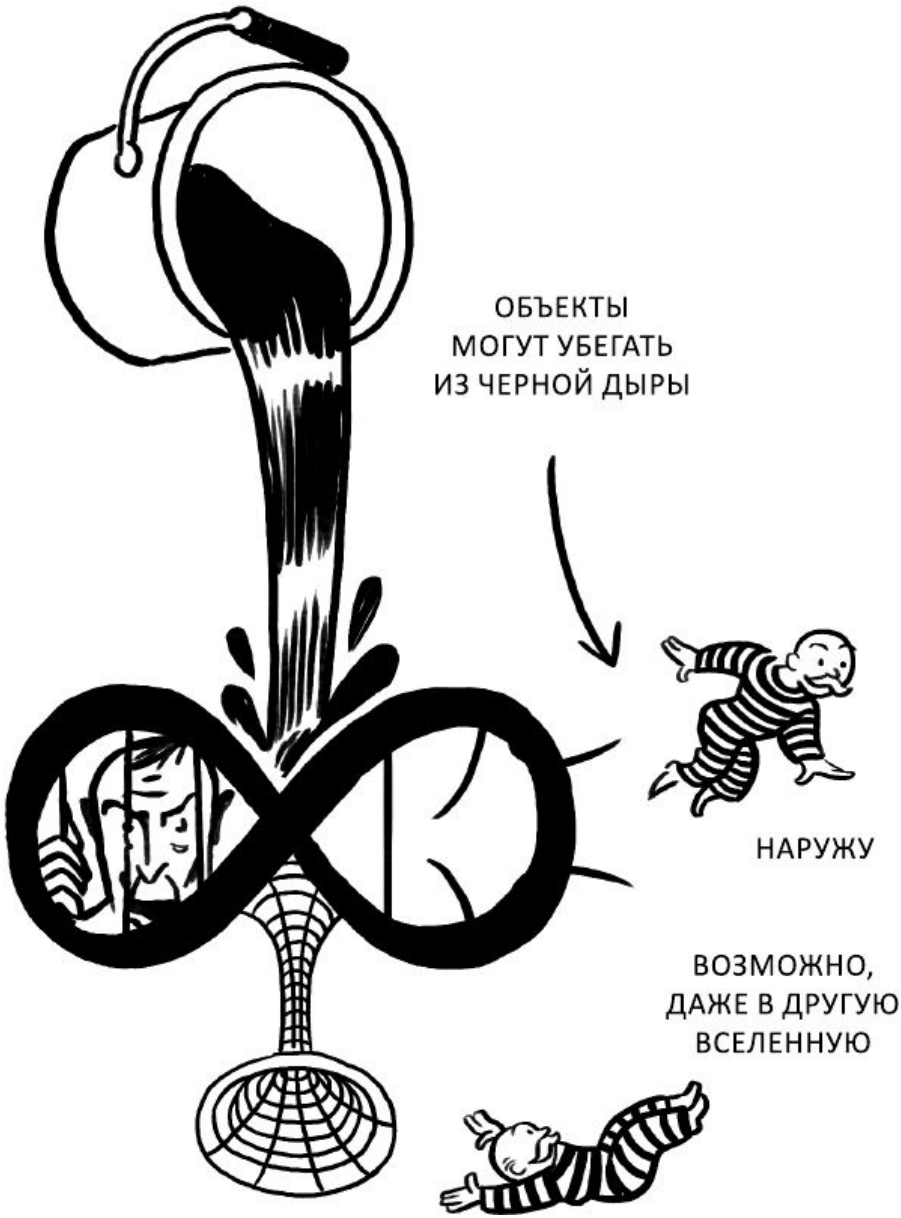
Д. Ш.: Теоретически – и с чисто детерминистической позиции по отношению ко Вселенной – вы можете сжечь энциклопедию, а потом восстановить ее в том случае,

если вам известны характеристики и положение каждого атома, который составлял каждую молекулу чернил и бумаги, и если вы можете отследить их в любой момент времени.

В настоящее время я работаю в Кембридже с моими коллегами Малколмом Перри и Эндрю Стромингером из Гарварда над новой теорией, в основе которой лежит математическая модель, называемая супертрансляцией. Мы хотим разработать механизм возвращения информации из черной дыры. Согласно нашей теории, информация кодируется на горизонте событий черной дыры. Нужно просто посмотреть внимательнее в нужное место!

Д. Ш.: С тех пор как были записаны эти лекции, профессор Хокинг и его коллеги опубликовали статью, где приводится пример математических расчетов, показывающих, как информация может быть сохранена на горизонте событий черной дыры. Их теория основана на преобразовании информации в двумерную проекцию в результате процедуры супертрансляции[20]*. Статья, названная «Мягкие волосы черной дыры», позволяет познакомиться с эзотерическим характером этой области, который в полной мере иллюстрирует аннотация, приведенная в конце этой лекции. Там же рассказано о проблемах, с которыми сталкиваются ученые, пытаясь объяснить этот математический феномен.*

Что все вышенаписанное может сказать нам о возможности нырнуть в черную дыру и вынырнуть в другой вселенной? Существование параллельных историй – с черными дырами и без них – свидетельствует, что такое в принципе возможно. Черная дыра должна быть большой, и если она вращается, то может препроводить нас в другой мир. Однако нельзя будет вернуться обратно. И хоть я и увлечен идеей передвижения в космическом пространстве таким образом, я не собираюсь ее испытывать.



Д. Ш.: Если черная дыра вращается, то ее внутренняя часть не содержит сингулярности в общепринятом смысле этого слова, то есть точки с бесконечной плотностью. Вместо этого там может быть сингулярность в виде кольца, что дает повод порассуждать не только на тему крушения в центр черной дыры, но и о возможности пронырнуть сквозь нее. То есть возможности навсегда покинуть ту Вселенную, которую мы так хорошо знаем. Стивен Хокинг заключает

свое выступление смелой мыслью: нечто может оказаться по ту сторону черной дыры.

В этой лекции я хотел донести до вас, что черные дыры совсем не так черны, как их малюют. Они отнюдь не вечная тюрьма, как однажды представляли. Объекты могут покидать черную дыру и возвращаться в нашу Вселенную или, быть может, попадать в другую. А потому если вы почувствуете, что оказались в черной дыре, не паникуйте: выход есть!

Мягкие волосы черной дыры [21]
Стивен У. Хокинг, Малколм Дж. Перри [22], Эндрю Стромингер [23]

Аннотация

Как недавно было показано, существование *BMS*-симметрий супертрансляции предполагает бесконечное число законов сохранения для всех гравитационных теорий в асимптотически плоских пространствах[24]. Эти законы сохранения требуют, чтобы черные дыры содержали большое количество «мягких», то есть обладающих нулевой энергией, супертрансляционных волос[25]. Присутствие поля Максвелла также подразумевает наличие «мягких» электрических волос; данная статья дает подробное описание этого понятия в терминах «мягких» гравитонов или фотонов на горизонте событий черной дыры. Мы показываем, что полная информация о квантовом состоянии черной дыры хранится в виде проекции на будущем горизонте этой черной дыры. Закон сохранения заряда используется для того, чтобы составить бесконечное количество точных связей между продуктами испарения черных дыр, которые обладают различными «мягкими» волосами, а в остальном идентичны. В предлагаемой работе также утверждается, что «мягкие» волосы, которые являются локализованными в пространстве на масштабах, меньше планковских, не могут быть усилены до физически реализуемого процесса. Как результат, эффективное количество «мягких» степеней свободы пропорционально площади горизонта событий в планковских единицах.

Стивен Хокинг считается одним из самых блестящих физиков-теоретиков со времен Эйнштейна.

В 1963 году, когда Стивену Хокингу был всего 21 год и он оканчивал магистратуру Кембриджского университета, врачи поставили ему диагноз «боковой амиотрофический склероз» (болезнь моторных нейронов) и прогнозировали, что едва ли он сможет прожить больше двух лет. Но он не смирился с приговором, стал блестящим исследователем, профессором колледжа Гонвилла и Киза, в течение 30 лет занимал почетную должность лукасовского профессора математики и теоретической физики, на какую в 1669 году был избран сэр Исаак Ньютон. В настоящий момент профессор Хокинг – директор по исследованиям в Центре теоретической космологии при Кембриджском университете. Он является обладателем более

десятка почетных званий, удостоен ордена Кавалеров Почета (1989). Стивен Хокинг – член Лондонского королевского общества и Национальной академии наук США.

Профессор Хокинг – автор книги «Краткая история времени», которая стала мировым бестселлером, а также других научно-популярных книг и эссе. В их числе: «Кратчайшая история времени», «Черные дыры и молодые вселенные», «О Вселенной в двух словах», «Высший замысел», «Теория всего» и ряда других. Стивен Хокинг живет в Кембридже[26].

Дэвид Шукмен – редактор новостей науки службы BBC с 2003 года. В его ведении находятся также события в области экологии и окружающей среды. С его слов англоязычные слушатели и читатели узнали о последнем запуске американского космического шаттла и о новых открытиях на БАК. Дэвид, бессменный участник подготовки десятичасовых новостей BBC, является автором трех книг.

notes

Примечания

1

Точнее, вещество, сосредоточенное в небольшой области и закручивающееся вокруг черной дыры в центре крупной галактики.

2

«3C» означает принадлежность объекта к т. н. Третьему кембриджскому каталогу радиоисточников; «273» означает порядковый номер объекта в упорядоченном списке по величине прямого восхождения.

3

Первый квазар 3C48 был обнаружен в 1960 году.

То есть окружающей черную дыру сферы, или поверхность шара.

5

Сумма энтропии и информации равна нулю. Если, к примеру, мы в точности знаем положения и скорости частиц газа, заключенного в некотором объеме (то есть обладаем абсолютно полной информацией), его энтропия равна нулю. Если об этом объеме газа нам неизвестно ничего, то его энтропия максимальна, и именно в таком смысле следует понимать Стивена Хокинга.

Речь, разумеется, идет о чисто теоретических исследованиях.

7

На которых действие сравнимо по величине с постоянной Планка.

Как и выше, речь идет не о реальном физическом процессе, а о его математической модели, или о так называемом мысленном эксперименте (*Gedankenexperiment*), который ввел в научный оборот А. Эйнштейн.

Это связано с неопределенностью энергии микрообъекта в некотором ненулевом промежутке времени.

10

Согласно теории Поля Дирака два уровня атома водорода (*S* и *P*) должны иметь одинаковые энергии, однако излучательные поправки, возникающие благодаря взаимодействию между атомным электроном и вакуумом, приводят к увеличению энергии уровня *S* относительно уровня *P* примерно на 1057 МГц. Это основа современной квантовой электродинамики. См. М. О. Скалли, М. С. Зубайри. Квантовая оптика.

11

Речь идет о рождении виртуальных пар снаружи, непосредственно вблизи горизонта событий черной дыры.

Следует помнить, что в результате коллапса звезды может образоваться черная дыра с массой не меньше трех солнечных масс (в случае т. н. мягкого уравнения состояния вещества нейтронной звезды можно ожидать наличие черной дыры с массой больше 1,5 солнечных), все остальные гипотетические черные мини-дыры если и образуются, то с помощью каких-то других механизмов. Теоретический спектр масс черных дыр непрерывен, и могут существовать и черные дыры с массой горы, и даже черные дыры с массами в несколько десятков планковских масс (т. н. первичные черные дыры).

13

Англ. interstellar, то есть «межзвездный». Режиссер Кристофер Нолан привлек для научных консультаций на тему пространственно-временных тоннелей известного физика-теоретика Кипа Торна. Несмотря на ряд художественных гипербол, в фильме впервые правильно изображается черная дыра.

Эффект заключается в следующем: вблизи горизонта событий рождается виртуальная пара частицы и античастицы. Далее, если на бесконечность уходит частица, а в черную дыру соответственно попадает античастица, то масса черной дыры уменьшается, поскольку античастица обладает отрицательной энергией.

15

В некоторых т. н. пертурбативных теориях гравитации, получаемых добавлением к теории Эйнштейна поправок по кривизне в сочетании с дополнительными полями, полного «испарения» черной дыры удается избежать. Остается т. н. реликтовый остаток, и никакого информационного парадокса не возникает. Такая теория тоже может быть проверена на БАК.

16

Оригинальный текст:

Napoléon: Monsieur Laplace, on me dit que vous avez écrit ce volumineux ouvrage sur le système de l'Univers sans faire une seule fois mention de son Créateur.

Laplace: Sire, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse.

Есть версия, что не Бога Лаплас считал ненужной гипотезой, а его вмешательство в определенном месте. Идея такой эпизодической настройки «машины мира» принадлежит Ньютону, с которым Лаплас и был не согласен.

17

См. комментарий выше о моделях реликтовых остатков черных дыр. *Black hole relics in string gravity: last stages of Hawking evaporation. S. Alexeyev et al. Class. Quant. Grav*. № 19: pp. 4431–4444, 2002.

18

Идея многомировой интерпретации квантовой механики, в которой существует множество параллельных вселенных, каждая в своем состоянии, принадлежит Хью Эверетту, ученику Джона Уилера.

19

Большинство ученых придерживается мнения, что черные дыры существуют. По состоянию на 2013 год найдено 26 звездных масс – кандидатов в черные дыры, для которых выполняются все критерии, предъявляемые этим объектам общей теорией относительности. См. А. М. Черепащук. Тесные двойные звезды, 2 тт. 2013 г.

Общая идея такой проекции не нова и носит название «голографический принцип».

21

Опубликована в крупнейшем бесплатном архиве электронных публикаций научных статей arXiv.org (arXiv:1601.00921v1 [hepth]; 5 января 2016).

Департамент прикладной математики и физики, Центр математических наук, Кембридж

23

Центр фундаментальных законов природы, Гарвард

24

BMS-симметрия, названная именами ее создателей (*Bondi – Metzner – Sachs*) и ассоциированная с *BMS*-группой, была изначально предложена для изучения гравитационного излучения замкнутых систем в асимптотически плоских пространствах. Эта группа оставляет инвариантной асимптотическую форму метрики соответствующего пространства.

Терминология не устоялась.

26

Стивен Уильям Хокинг скончался 14 марта 2018 года. – *Прим. ред.*